

# 仮想センサによる空間センシングシステムの提案

川崎 仁<sup>1,a)</sup> 本間 直子<sup>1</sup> 大瀧 尚厳<sup>1</sup> 浮穴 朋興<sup>1</sup>

**概要：**ビルにおいて、ビル全体での省エネルギーとビル内に在籍している個人の快適性を両立するサービスを実現するために、空間センシングシステムへの関心が高まっている。個人の快適性を考慮するためには、人の周囲の環境情報をリアルタイムでセンシングする必要がある。また、ビルシステムには人の移動に追従した空間のセンシングが求められる。従来のビルにおけるセンシングシステムはこうした新しい要件を満足することが出来ない。本研究では、こうしたセンシングを実現する方式として、任意座標のセンサ値を生成する仮想センサによるビル向けの空間センシングシステムを提案する。そして、ビルにおける空間センシングシステムに求められる要件を定義し、提案方式を実装したシステムが当該要件を満足できることを示した。

## Sensor System for Monitoring Environment using Virtual Sensors

KAWASAKI JIN<sup>1,a)</sup> HOMMA NAOKO<sup>1</sup> OHTAKI YOSHITAKA<sup>1</sup> UKIANA TOMOOKI<sup>1</sup>

### 1. はじめに

IoT (Internet-of-Things) [1][2][3] の普及により、様々なセンサを用いて空間を細かく計測して、空間の状態を正確に把握し、把握結果に基づいて空間を最適状態に制御する空間センシングシステムの研究開発が行われている。例えば、産業分野においては、従来から進められてきたセンシングによる空間の状態把握に関する取り組みを発展させて、センシング結果を工場設備あるいは車両の制御にフィードバックする研究がおこなわれている [4][5]。こうした研究が加速する技術的な背景としては、センサ価格の低下、軽量な通信インタフェースの普及、データ解析技術の進歩などが寄与しており、今後も空間センシングの技術進展が期待されている [6]。

ビルの分野では、温湿度や CO2 濃度を計測して空調設備の制御にフィードバックすることが行われているが、設置されるセンサの数はエリアあたり数個程度にとどまってきた。ビル内でセンサデータを集約するビル管理システムを例にとると、3 千平方メートル未満の小規模ビルを対象と

した製品で管理点数は数十から数百点程度であり、すべての接点がセンサであるとしてもそのセンサ数は 1 平方メートルあたり 1 個に満たない [7]。<sup>\*1</sup> また、1 万平方メートル以上の大規模ビルを対象とした製品では管理点数が 1 万点程度であり、すべての管理点をセンサと接続した場合でも 1 平方メートル当たり 1 個程度である [8]。これまでは、省エネルギーの達成に必要な電力メータや設備の稼働履歴が計測データの中心であり、空間センシングのセンサはそれほど多く必要ではなかったため十分であった。しかし、ビルにおいてビル内の詳細なセンシングが必要となる新しいソリューションへのニーズが高まっており、こうした社会的要請に応えるために空間センシング技術の革新が目まぐるしく行われている。

ビルにおける新しいソリューションの 1 つが、ビル全体での省エネルギーとビル内の個人の快適性を両立するサービスの実現である [9]。個人の快適性を考慮するためには、人の周囲の環境情報をセンシングする必要がある。求められるセンサ数が従来の省エネ目的のセンサに比べて格段に増加する。例えば、オフィスビルにおいては 100cm から 120cm 程度の距離で座席が並んでおり個人を対象にしたセンシングを行うためには、この間隔でセンサを設置する必

<sup>1</sup> 三菱電機株式会社  
Mitsubishi Electric Corporation, Ltd, Kamakura, Kanagawa  
254-8501, Japan

<sup>a)</sup> Kawasaki.Jin@bx.MitsubishiElectric.co.jp

<sup>\*1</sup> 実際には、すべての管理点をセンサに割り当てることはできない。

要がある。加えて、個人の快適性をより正確に把握するためには、人の移動に追従して空間の環境情報をセンシングすることが求められる。オフィス内における人の移動速度は1.5m/秒程度とする研究 [10] もあり、この移動速度に追従できるセンシングシステムが必要である。本研究では、こうしたセンシングを実現する方式として、任意座標のセンサ値を提供する仮想センサによる空間センシングシステムを提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章でビルにおける空間センシングシステムに求められる要件を定義し、次に3章でその要件を満足する仮想センサによる空間センシングシステムを提案し、その実装について述べる。4章では、提案方式が2章で定義した要件を満足しているか、また、実システムへの適用可否を考察する。5章で関連研究との差異を述べ、最後に6章で全体をまとめる。

## 2. 背景と課題

本章では、ビルシステムの概要を示した後に、ビルにおける空間センシングシステムの課題を議論し、今後必要とされる空間センシングシステムの要件を定義する。

### 2.1 ビルシステムとセンサ

ビルシステムの構成を図 1 に示す。ビルシステムは大規模ビルではその最上位に中央監視が設置されている。中央監視はその目的に応じて、ビル管理システム (BAS: Building Automation System) やエネルギー管理システム (BEMS: Building Energy Management System)、監視 PC が設置される。中央監視の次のレイヤには設備を管理するコントローラがあり、中小規模ビルでは中央監視がなくこれらのコントローラを使って管理しているビルが多い。コントローラは、設備をサブシステムごとに管理しており、空調サブシステムを管理する空調コントローラ、照明サブシステムを管理する照明サブシステム、入退室サブシステムを管理する入退室管理コントローラなどがある。こうした階層構造で実現されているビルシステムの末端にあるのがビル設備である。ビルには様々なビル設備 (例えば、空調設備、換気設備、照明設備、給湯設備、入退設備、エレベーター/エスカレーターなど) が設置されており、日々制御されている。こうした設備の制御にはセンサデータが用いられており、例えば温度センサに基づいて空調制御が行われたり、人感センサに基づいて照明制御が行われたりしている。センサは、設備施工時に合わせて設置されるのが普通であり、設置後に移動することは想定されていない。また、センサは設備と紐づいており、他の設備やシステムから利用されることは想定していない。

### 2.2 従来の空間センシングシステムとその課題

これまで、ビルの建設や管理に関わる制度は省エネ

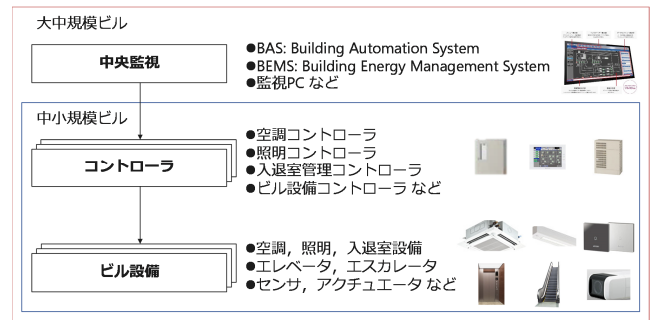


図 1 ビルシステムの構成

Fig. 1 Overview of the building management system.

ギーや環境性能に集中していたため、ビル内のセンシングシステムも設備の稼働状況や消費電力を管理することが主眼となっていた。例えば、電力の需給調整を目的としたデマンドレスポンス [11] や建築物と敷地利用についての環境性能評価システムとして SGBC が開発した LEED [12] が取り組まれてきた。こうした目的では、ビル内の環境センシングはそれほど重要ではなく、設置されるセンサの種類や数も限られていた。しかし、近年ビルの分野において、省エネルギーに代わる新たなソリューションが登場している。例えば、Well Building Standard [13] のように、建物を利用する人間の快適性や健康に着目した建築物総合環境性能評価システムに注目が集まっている。こうした環境性能評価システムでは、従来ではビル内で常設されることが一般的ではなかった、センサの値も計測することが求められている。

今後のビルにおいては省エネルギーや環境性能に加えて、ビルの利用者の快適性や健康も考慮するために空間センシングシステムの新しいニーズが高まると考えられる。こうした新しいニーズに対して、従来ビル内で用いられてきたセンシングシステムでは十分に対応することができない。まず、ニーズに対応するビルにおいては、対象とするセンサの種類が従来に比べて増加し、多数のセンサを設置することが必要となる。例えば、快適性に関する指標である PMV [14] は、温熱環境に基づく快適性を表現する指標であり、指標値の算出には温熱 6 要素 (温度、湿度、気流速度、放射温度、代謝量、着衣量) が必要となる。空調制御を個人の快適性を考慮して行うためには、こうしたセンサ値をリアルタイムにかつ人のいる座標に対して計測することが求められる。加えて、ビル内の在籍者はそれぞれの目的に応じてオフィス内を移動して回るため、在籍者の移動に追従して在籍者のいる地点のセンサ値を計測する必要がある。しかし、ビル内で用いられているセンシングシステムは設備の施工時に設置するため、こうした多種多様な環境情報を人の移動に合わせてセンシングすることはできない。以上の理由から、ビル内で任意座標のセンサ値を計測できる空間センシングシステムが求められている。

## 2.3 ビルにおける空間センシングシステムの従来研究

センシングシステムについてはビル以外の分野でも研究が取り組まれており、様々な仕組みが提案されている。特に、任意の座標に対してセンサ値を取得することが出来るようにするために、センサ値の補間アルゴリズムが用いられている。しかし、従来の方式には以下の課題がある。

例えば、センサデータの可視化を目的として、可視化の際にアプリケーションでセンサ値を内挿あるいは外挿することが行われている。センサ値の補間アルゴリズムとしては、線形補間、スプライン補間、逆距離加重補間などが知られており、アプリケーションが目的に応じて使い分ける。同様の方法は、センサデータのビッグデータ分析において、欠損値のあるデータセットに対して補間によるデータの前処理をかける際にも利用されている。こうした方式をビルにおけるセンシングシステムに適用する場合、アプリケーションごとに再計算をする必要が生じるため、ビルシステムの組込み装置に適用するのは困難である。

別のアプローチとして、スマートフォンのセンサを用いて、人のいる場所の環境情報をセンシングする方法がある。しかし、ビル内のすべての人に共通のアプリケーションやウェアラブルデバイスの装着を求めることは実サービスとしては難しい。また、スマートフォンやウェアラブルデバイスでは、室温や照度などを正確に取得することは困難である。

したがって、従来研究されてきたこれらのセンシングシステムを新しいソリューションにそのまま適用することはできない。

## 2.4 ビルにおける空間センシングシステムの要件

従来のセンシングシステムの課題を解決するビルの空間センシングシステムの要件を、本研究では、以下のとおり定義する。

- 任意座標のセンサ値を取得できること  
個人の快適性を考慮してビルを運用するために、今後のビルにおいてはビル内の在籍者の周囲のセンサ値を取得できるようになる。そのため、アプリケーションは、座席レイアウトや人の移動に合わせて任意の座標についてセンサ値を取得して利用する。しかし、ビル内のレイアウトやデザインによりセンサを設置できる場所には制約が生じる。また、人の移動に備えて、オフィス内に多種多様なセンサを密に設置することはできない。そこで、ビル内の任意座標のセンサ値を取得することが必要である。
- 任意時刻のセンサ値を取得できること  
ビルの省エネルギーと個人の快適性の両立を図るためには、ビルの管理者が設備の最適な運用を検討する必要がある。そのため、過去の空間状態を分析して問題点を抽出する用途として過去のセンサ値を利用する。

さらに、将来の空間状態を予測して設備の運用計画を立案するために将来のセンサ値を利用する。したがって、今後のビル向けの空間センシングシステムでは過去から将来まで任意時刻のセンサ値を取得できることが必要である。

### ● 運用中の環境変更に強いこと

ビルの運用中は、組織変更やフロア移動に伴うオフィスレイアウトの変更や、設備の経年経過によるリプレースが行われる。このような場面では、それまでセンサを設置していた場所が設置位置として適切ではなくなり（例えば、配線ができない、電波環境が悪化、など）、センサを移設したり撤去したりすることがある。こうした変更が生じた場合にアプリケーション側の改修が生じることは望ましくなく、環境変更後も任意座標・任意時刻のセンサ値を取得し続けられるような変更に強い空間センシングシステムが求められる。

次章では、これらの要件を満足するセンシングシステムを提案する。

## 3. 提案方式

本章では、前章で定義した3つの要件を満足するビルの空間センシングシステムを提案する。また、提案方式をオフィスを模擬した実験室に構築、実装した結果を述べる。

### 3.1 仮想センサ

ビル内の任意座標のセンサ値を計測するためには、あらゆる場所にセンサを動的に設置しなければならないが、実際にはセンサが設置可能な場所はオフィスの机上や壁面、天井面などに限られている。本研究では、センサと同様にセンサ値を計測することができる仮想センサをビル内に設置することでこの問題を解決する。本稿では、実際に物理環境に設置されたセンサを実センサと呼び、仮想センサとは区別する。仮想センサは、実センサが設置できない場所であっても設置できるため、ビル内のあらゆる場所、つまり任意座標のセンサ値の計測が可能となる。アプリケーションからは、実センサと仮想センサを区別することなくセンサとして扱えるようにする。

本研究では、仮想センサを、座標  $coordinate(x, y, z)$ 、センサ種別  $type$ 、時刻  $t$  を与えることで、センサ値 ( $SV$ ) を返す関数  $v()$  として定義する。

$$SV = v(coordinate(x, y, z), type, t) \quad (1)$$

また、実センサも同様に、座標  $coordinate(x, y, z)$ 、センサ種別  $type$ 、時刻  $t$  を与えることで、センサ値 ( $SV$ ) を返す関数  $r()$  として定義する。

$$SV = r(coordinate(x, y, z), type, t) \quad (2)$$

仮想センサと実センサは同じ関数で表現されており、ア

アプリケーションからは区別することなく扱う。

仮想センサのセンサ値 SV は実センサのセンサ値から外挿あるいは内挿した値を用いる。外挿あるいは内挿のアルゴリズムは、計測するセンサ値の特徴や設置する環境によって最適なものを選択してよい。例えば、照度センサの値は線形補間し、温度センサの値はスプライン補間を用いて異なるアルゴリズムを利用する。

### 3.2 仮想センサによる空間センシングシステム

本節では提案する仮想センサによる空間センシングシステムについて述べる。提案方式のシステムは、実センサとそのセンサ値を収集する機能、アプリケーションからの要求に対してセンサ値を応答するインタフェース機能、実センサのセンサ値から算出した値を応答する仮想センサ機能、センサ値の蓄積データベースにより実現する。提案方式の特徴は、実センサが設置されていない場所にもセンサが設置されているかのようにアプリケーションに見せることができることである。そのために仮想センサを利用して、仮想センサはアプリケーションからの要求に応じて動的に最適な場所に生成されることも特徴である。

実センサのセンサ値を収集する機能は、あらかじめ定められた契機でそれぞれのセンサに応じた方法でセンサ値を収集し、データベースに蓄積する。アプリケーションは、実センサの設置場所に依らずインタフェースに対して座標、センサ種別、時刻を指定することでセンサ値を取得する。はじめにインタフェースが呼び出されたとき、実センサが設置されていない座標が指定されたとする。センサ値はデータベースに蓄積されていないため、この座標に対して仮想センサを生成し、センサ値をデータベースに蓄積する。インタフェースは仮想センサによりデータベースに蓄積されたセンサ値をアプリケーションに応答する。

一度生成された仮想センサは、以降も実センサのセンサ値収集と同期してセンサ値を蓄積する処理を継続する。また、仮想センサは、ビル管理者やサービス事業者が実センサの設置と合わせて、あらかじめ生成しておくこともできる。仮想センサの定義情報は空間センシングシステムで管理する。

センサ値は、座標、センサ種別、タイムスタンプと共に蓄積する。座標はセンサの設置場所を差しており、実センサであれば実際に設置されている場所の座標であり仮想センサであれば仮想的に設置されている場所の座標である。センサ種別は温度センサであれば“THERMAL”，CO2 センサであれば“CO2”などを定義しておく。アプリケーションからセンサ種別を指定できるように、定義一覧をアプリケーションと共有する。タイムスタンプはセンサ値が取得された時刻である。

システムの運用中に仮想センサのキャリブレーション（再設定）を行うことができる。例えば、実センサの設置

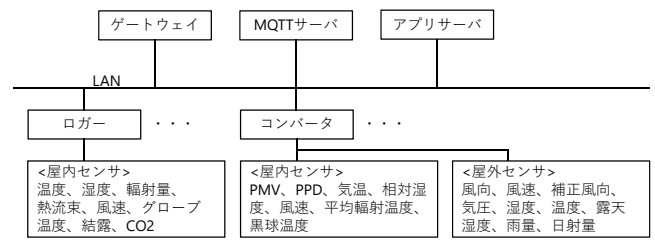


図 2 仮想センサによる空間センシングシステムの構成

Fig. 2 Architecture of environment sensing system using virtual sensors.

場所の変更や実センサの追加、撤去のタイミングで仮想センサがセンサ値を計算するために用いる実センサを変更して、仮想センサの精度を上げることができる。空間センシングシステムで管理している仮想センサの設定情報を変更して保存する。

### 3.3 提案方式の実装

本節では提案方式を実装した結果を述べる。仮想センサを用いた空間センシングシステムのシステム構成図を図2に示す。はじめにシステムを実現した環境について述べ、その後にシステムの構成要素であるゲートウェイ、MQTTサーバ、アプリケーションサーバ、仮想センサ機能の実装を述べる。

#### 3.3.1 実現環境

本研究では、提案する空間センシングシステムをオフィス環境を模擬した実験室を対象として検討、構築する。実験室には84平方メートルの部屋が二部屋あり、それぞれ空調設備、照明設備、入退室管理、中央監視などのビルシステムを有している。また、この実験室にはオフィス内の環境情報をセンシングするために必要なセンサを表1に示すとおり設置している。接続方法は、センサをネットワーク接続するために用いる中継装置を指しており、ロガー（電圧・電圧変換）とコンバータ（RS232-Ethernet 変換）を利用している。なお、日射計とウェザーステーションは屋外設置センサであり、実験室の外部に設置している。

#### 3.3.2 ゲートウェイ

ゲートウェイは、ロガーあるいはコンバータを経由して、各センサからセンサデータを収集し、MQTT プロトコルに変換して送信する機能を提供する。ゲートウェイの機能は、組込み機器の JavaVM 上の OSGi Framework で動作する Java バンドルとして実装した。

センサデータの収集は、センサ毎に異なる通信プロトコル、通信周期で実現する。利用した通信プロトコルは、HTTP, FTP, TCP であり、センサ種別ごとに Java スレッドを分割した。通信周期は、最短のセンサで 100 ミリ秒周期、最長のセンサで 5 秒周期とした。

各センサから収集したセンサデータは、MQTT プロトコルを用いてアプリケーションサーバに送信する。センサ

表 1 実験室に設置しているセンサの種類・接続方法・センサ数  
**Table 1** Overview of sensor types and connection types and numbers installed at lab.

| #  | センサ種別      | 接続方法  | センサ数 |
|----|------------|-------|------|
| 1  | 温度センサ      | ロガー   | 191  |
| 2  | 湿度センサ      | ロガー   | 12   |
| 3  | 風速センサ      | ロガー   | 12   |
| 4  | 輻射センサ      | ロガー   | 8    |
| 5  | 熱流束センサ     | ロガー   | 10   |
| 6  | グローブ温度計    | ロガー   | 4    |
| 7  | CO2 センサ    | ロガー   | 2    |
| 8  | 結露センサ      | ロガー   | 6    |
| 9  | 日射計        | コンバータ | 1    |
| 10 | PMV 計      | コンバータ | 1    |
| 11 | ウェザーステーション | コンバータ | 1    |

データは JSON 形式に変換したメッセージとして送信する。MQTT プロトコルの概要は次節で述べる。

### 3.3.3 MQTT サーバ

MQTT サーバは、ゲートウェイで収集したセンサデータをアプリケーションサーバに送信するために用いる。MQTT は IBM が開発した IoT アプリケーションに適した通信プロトコルであり、軽量・非同期であることを特徴としている。本研究では、前述の周期でのセンサデータ収集に適した方式として MQTT を採用している。また、MQTT はクラウドサービスの PaaS でも採用されており、今後アプリケーションサーバをクラウドに移行する際にも移行が容易となる。MQTT サーバ上では、MQTT broker 機能を提供するソフトウェアとして、オープンソース実装である mosquitto を利用している。

### 3.3.4 アプリケーションサーバ

アプリケーションサーバでは、(1) センサデータの MQTT サブスクライバ、(2) センサデータのデータベース蓄積処理、(3) センサデータ DB (データベース)、(4) 仮想センサを実行している。

センサデータの MQTT サブスクライバは、Java で実装された MQTT クライアントである Paho を用いて実装している。MQTT サーバから受信したセンサデータをメッセージから取得し、次のデータベース蓄積処理に渡す。

センサデータのデータベース蓄積処理では、センサデータ DB のテーブルにセンサデータをインサートしている。本処理も Java により実装しており、前段のセンサデータの MQTT サブスクライバから呼び出されて実行する。

センサデータ DB はセンサデータ用のテーブルを用意したリレーショナルデータベースであり PostgreSQL で構築した。

### 3.3.5 仮想センサ機能

本研究では、仮想センサを Java アプリケーションとデータベースにより実装した。補間アルゴリズムは、直近の実センサの値の平均値を仮想センサの値とした。データベー

スには仮想センサの座標とセンサ種別を格納し、Java アプリケーションが直近の実センサを探索してそのセンサ値の平均値を仮想センサの値としてデータベースに格納した。

## 4. 考察

本章では、提案方式である仮想センサによるビル向けの空間センシングシステムの価値と効果を考察する。

### 4.1 センシングシステムの要件に対する考察

本節では、提案方式がビル向けの空間センシングシステムの要件を満足できるかという点を考察する。

#### 4.1.1 任意座標のセンサ値の取得

ビル向けの空間センシングシステムの 1 つ目の要件は任意座標のセンサ値の取得ができることである。今後のビルのアプリケーションでは、空間内の任意の座標に対してセンサ値を取得して利用できる必要がある。提案方式の仮想センサによる空間センシングシステムは、アプリケーションがセンサ値を要求すると、指定座標の実センサの有無に依らずにセンサ値を応答する。指定座標に実センサがない場合は、システム内部では仮想センサを生成して実センサと同様にセンサ値を取得する。仮想センサはアプリケーションには隠蔽されており、また、仮想センサの生成に要するオーバーヘッドは小さいため、アプリケーションは実センサの有無に依らず動作できる。人がビル内の移動する場合は、移動に合わせて仮想センサを生成するため、個人の周囲のセンサ値を常に取得して利用することができる。したがって、提案手法はこの要件を満足している。

#### 4.1.2 任意時刻のセンサ値の取得

ビル向けの空間センシングシステムの 2 つ目の要件である任意時刻のセンサ値を取得について議論する。ビルの省エネルギーと個人の快適性の両立を図るためには、ビルの管理者が設備の最適な運用を検討するために過去から将来にわたる任意の時刻のセンサ値を利用できなければならない。提案方式のシステムは、実センサの値に加えて、仮想センサの値をデータベースに蓄積することができる。そのため、アプリケーションは仮想センサが生成されてから現在に至るまでの任意の時刻のセンサ値を取得して利用できる。アプリケーションが仮想センサが設置されていない時刻のセンサ値を要求した場合、あるいは将来のセンサ値を要求した場合は、その時点で仮想センサを生成してセンサ値を取得することができる。したがって、アプリケーションからは実センサの設置位置に依らずセンサ値が過去から将来にわたって取得可能となる。以上より、提案手法はこの要件を満足している。

#### 4.1.3 運用中の環境変更への強さ

ビルの運用中は、組織変更やフロア移動に伴うオフィスレイアウトの変更や、設備の経年経過によるリプレースにともなって実センサの移設や撤去が発生する。そうした場

合であっても、任意座標・任意時刻のセンサ値を取得できる環境変更に強い空間センシングシステムが求められる。提案方式の空間センシングシステムでは、例えば、センサが撤去された座標のセンサ値をアプリケーションから要求された場合に、仮想センサを生成してその座標のセンサ値を応答できる。また、変更によりビル内の在籍者の人数が増えた場合に、取得しなければならないセンサ値が増加する。そうした場合であっても、実センサの追加や移設を実施することなくアプリケーションの実行を継続し、その後順次実センサの追加や移設を行うことができる。このように、アプリケーション開発者は実センサの設置位置を意識する必要がなく、提案方式は運用中の環境変更に対して十分強いといえる。

## 4.2 多種多様なセンサへの対応

ビル向けの空間センシングにおいては、多種多様なセンサに対応することが求められる。提案方式のセンシングシステムは特定のセンサに依存する方式にはなっていないためこの要求を満たす。例えば、センサの種類別に依らず、共通のデータ構造で定義されており、補間アルゴリズムの実装は仮想センサの中で独立して実装することが出来る。したがって、提案手法は多種多様なセンサを考慮する必要のあるビルシステムに対して適用可能なセンシングシステムと言える。

## 4.3 センサ値アクセス I/F の共通化

別の視点としてセンサ値にアクセスする I/F の共通化について議論する。提案手法のアーキテクチャは、実センサ、仮想センサに依らず共通のセンサアクセス I/F によってセンサデータを取得できる。今回の実装においては、SQL によるセンサデータへのアクセスを提供しているが、WebAPI による提供に置き換えることも容易にできる。これにより、提案手法はセンサの種類や実センサか仮想センサかに依らず共通の I/F によりアプリケーションに対してセンサデータを提供できる。

## 5. 関連研究

仮想センサに関する研究として、Kabadayi[15] は実センサの値から実際にはセンサが取り付けられていない種類のセンサデータを取得できるようにする仮想センサを提案している。これによりアプリケーション開発者の開発負荷を低減することが出来る。本研究の提案方式による仮想センサも同様のインタフェースをアプリケーションに提供している点で類似している。しかし、仮想センサを実センサと同様に扱って、センサデータ DB にデータを蓄積することでアプリケーションが容易にデータにアクセスできるようにしている点で異なる。

若森らは、空間補間を用いたセンサデータの可視化シス

テムを提案している [16]。この提案では、ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) のセンサデータをセンサ GW 経由で収集してクライアント PC で可視化するシステムを構築している。可視化のリアルタイム性を維持するために、補間処理の並列化と WebGL による高速化を実装している。本研究の提案手法は、収集したセンサデータを用いて演算した仮想センサの値をデータベースに蓄積して再利用できるようにしている点で異なる。また、センサデータの収集に MQTT を採用することで可視化と非同期にデータを収集できる点でも異なる。

高橋らは、センサをクラウド上の IT 資源の 1 つとして扱うことができるセンサークラウドを提案している [17]。センサークラウドでは、アプリケーションはセンサデバイスを仮想化した仮想センサデバイスを実センサと同様に扱うことができる。この点で、本研究の仮想センサによる空間センシングシステムと類似点があるが、仮想センサは仮想マシンの 1 デバイスとしてマッピングされるようになっており、クラウド上で構築することを前提としている点で設計が異なる。提案方式では、特定の仮想化環境でしか動作しない設計になっておらず汎用性が高く、提案方式の仮想センサをセンサクラウドに組合わせて利用することもできる。また、Madria らは WSN の構造をユーザから隠蔽する手段として仮想センサの利用を提案している [18]。本研究では、ネットワーク構造の隠ぺいではなく、実センサのない任意座標のセンサ値を取得する手段として仮想センサを利用している点で異なる。

## 6. おわりに

ビルにおける空間センシングシステムへの要求の変化に対応する仮想センサによる空間センシングシステムを提案した。本論文では、まずビルの空間センシングシステムの要件を 3 つ定義し、それらの要件を満足する方式を提案し、オフィス環境を模擬した実験室に実装した結果を述べた。提案方式の空間センシングシステムは要件を満足しており、有効であることを確認した。

今後は、提案方式の空間センシングシステムをビルアプリケーションを想定したユースケースに基づいて性能評価する。また、実センサと仮想センサを統合管理するシステムについても研究に取り組み、ビルシステムへの適用を検討する。

## 参考文献

- [1] Luigi Atzori, Antonio Iera, G. M.: The Internet of Things: A survey, *Elsevier Computer Networks*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787–2805 (2010).
- [2] Da Xu, L., He, W. and Li, S.: Internet of things in industries: A survey, *IEEE Transactions on industrial informatics*, Vol. 10, No. 4, pp. 2233–2243 (2014).
- [3] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. and

- Zorzi, M.: Internet of things for smart cities, *IEEE Internet of Things journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 22–32 (2014).
- [4] 池澤克哉, 鶴畑清臣, 小田信二, 林俊介: 産業界から見たシステム技術とIoT, 計測と制御, Vol. 55, No. 4, pp. 295–299 (2016).
- [5] 佐藤雅明: インターネットと自動車情報の融合, コンピュータソフトウェア, Vol. 31, No. 3, pp. 3.17–3.31 (2014).
- [6] 岩野和生, 高島洋典: サイバーフィジカルシステムとIoT (モノのインターネット) 実世界と情報を結びつける, 情報管理, Vol. 57, No. 11, pp. 826–834 (2015).
- [7] 金子雄, 伊藤俊夫, 原隆浩ほか: 仮想化が機器状態監視の定刻性に与える影響の一評価, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 1566–1577 (2016).
- [8] 柴昇司: ビルエネルギーマネジメントシステム "FacimaBA-system BEMS" (2014).
- [9] 太田恵大, 浮穴朋興, 三浦健次郎: 進化型多目的最適化による空調制御, 進化計算学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 118–125 (2015).
- [10] 野口博史, 山田隆基, 森武俊, 佐藤知正: 大量の人移動計測データに基づく移動ロボットの人回避経路計画, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 7, pp. 684–694 (2012).
- [11] Rahimi, F. and Ipakchi, A.: Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm, *Smart Grid, IEEE Transactions on*, Vol. 1, No. 1, pp. 82–88 (2010).
- [12] USGBC: LEED - Leadership in Energy and Environmental Design.
- [13] Institute, I. W. B.: WELL v2 pilot (2018).
- [14] ISO: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (2005).
- [15] Kabadayi, S., Pridgen, A. and Julien, C.: Virtual sensors: Abstracting data from physical sensors, *Proceedings of the 2006 International Symposium on on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, IEEE Computer Society, pp. 587–592 (2006).
- [16] 若森和昌, 丸島晃明, 峰野博史: マルチストリーミングセンサデータ向けリアルタイム空間補間可視化システム, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol. 7, No. 2, pp. 76–86 (オンライン), 入手先 <https://ci.nii.ac.jp/naid/170000148561/> (2017).
- [17] 高橋ひとみ, 串田高幸: センサークラウド: センサデバイスをIT資源とする拡張クラウド環境, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 2, pp. 672–687 (オンライン), 入手先 <https://ci.nii.ac.jp/naid/110009537066/> (2013).
- [18] Madria, S., Kumar, V. and Dalvi, R.: Sensor cloud: A cloud of virtual sensors, *IEEE software*, Vol. 31, No. 2, pp. 70–77 (2014).